

# 最適化システムCAOSによる電子機器の最適実装設計

## Computer-Aided Optimization System (CAOS) for Optimal Designing of Electronic Equipment

あらまし

電子機器の高密度小型軽量化に伴い、電子パッケージの熱応力や発熱の問題は無視できなくなっている。これらの対策として、シミュレーションを設計段階で事前に行い、応力や温度を定量的に評価する試みが、設計現場において数多く実施されている。これらシミュレーションは従来の実験評価よりも安価に短時間で評価が可能であり、設計期間短縮やコストダウンに有効な手法である。

しかし、これまでの事例の多くは設計案一つに対する確認作業に停まっており、多くの設計案の中から、最適な設計変数の組合せを決定する最適設計は、計算回数が大幅に増大するため実用化が困難であった。

そこで、今回、実験計画法を数値シミュレーションに取り入れ、効率的に最適化計算を行う統計的最適化システムCAOSを開発した。本稿では、CAOSシステム開発の技術的背景、基本原理、実装冷却設計への適用事例の紹介を行う。

### Abstract

As more and more parts are integrated into smaller and lighter bodies, thermal stress and heat generation in electronic packages are becoming serious problems. This has prompted many designers to use computer simulation to quantitatively estimate thermal stress and temperatures early in the design process. Computer simulation is an effective method of evaluation that is quicker and less costly than conventional evaluation methods based on experiments. However, it has been difficult to use computer simulation to optimize the combination of a large number of design ideas because such an optimization requires an extremely large amount of calculation. Therefore, computer simulation has mostly been applied to one or a few design ideas. Fujitsu has developed a new statistical optimization system called "Computer-Aided Optimization System (CAOS)" which incorporates an experimental evaluation method into numerical simulation and efficiently performs optimization by computer simulation. This paper describes the technical background and principle of CAOS and an example application of CAOS to electronic-package cooling design.



酒井秀久（さかい ひでひさ）

実装テクノロジー統括部CAE技術開発部所属  
現在、エレクトロニクス実装に関する構造解析業務に従事。



清水啓史（しみず けいし）

磁気ディスク事業部開発部所属  
現在、磁気ディスク実装、熱設計に関する解析業務に従事。



山岡伸嘉（やまおか のぶよし）

磁気ディスク事業部開発部所属  
現在、開発部プロジェクト課長。

## まえがき

パソコンや携帯電話に代表される電子機器の開発においては、プロセッサの高性能化や装置の小型化に対応した冷却、実装技術の開発とともに、最近では顧客側の製品使用環境の多様化に適した製品仕様(低騒音性、耐衝撃性、薄型軽量化)の実現が求められている。

このように設計課題が多種多様化していく状況においては、従来の実験評価に基づいた試作依存型の設計からシミュレーション技術をベースとした設計検証型の設計手法への転換が重要となってくる。とくに、互いに競合する様々な設計要求を満たす設計解を求める最適設計技術が、今後の設計プロセスでの大きな位置を占めてくると考えられる。最適設計は、設計上の様々な制約条件下で、最も優れた設計目標を達成する構造物の寸法、物性値、拘束条件などを求める技術である。

今回著者らは、非線形解析に対しても比較的少ない計算回数で最適化計算を行う手法として、実験計画法をシミュレーションと組み合わせることによって最適化計算を行う応答曲面法(Response Surface Method)に注目した<sup>(1),(2)</sup>

本手法は非線形で複雑な構造物にも適用可能であり、電子機器設計には極めて有力な手法であると考えられる。そこで著者らは、上記の応答曲面法をベースとしたコンピュータ支援最適化システムCAOS(Computer Aided Optimization System)の開発を行った。本稿ではシステムの概要と、本システムを実際の電子機器の実装、冷却設計に適用し、最適設計を行った事例を報告する。

## シミュレーションと最適設計

電子機器の実装設計過程においては使用条件に応じて、様々な種類のシミュレーションが行われている。これまではシミュレーションの適用は設計仕様の検証に停まってきたが、今後は最適な設計を行う最適化解析技術の開発が重要となってくる。最適化解析は寸法、物性値、拘束条件などの設計変数をパラメタとして、目的とする評価値(評価関数)が最大(または最小)となる最適な設計変数を求める技術である。従来の手法では設計変数を変化させて何回かの解析を繰り返し行う必要があるため、設計変数変更を効率良く行わなければならない。従来最もよく行われていた最適化技術には、数値計画法<sup>(3)</sup>とシミュレーションに感度解析を用いる方法がある<sup>(4)</sup>

数値計画法は、一定の制約条件下で、評価関数の最大値(または最小値)を求める手法である。基本的には各反復過程ごとに評価関数の計算が必要で、毎回更新した設

計変数でシミュレーションを行うこととなり、計算量が膨大となる。とくに大規模モデルの構造解析では1回の計算に最新の高速EWSをもってしても数時間から数十時間を必要とする。したがって、従来の感度解析を用いた最適化では、評価関数を評価点まわりでテイラー展開した近似モデルを用いることによって、計算時間短縮を図る手法が取られていた。

### ● 従来の最適化

モデル作成→シミュレーション→感度解析

↑ 反復

従来の手法ではシミュレーションと近似処理を何度も繰り返して行うため、計算時間が非常に長くなるという問題が解消されなかった。また、衝突現象や、金属の塑性のような非線形問題では、感度計算が不安定となる問題が発生するため、電子機器設計に必要とされる落下衝撃強度、熱疲労寿命などのほとんどのシミュレーションに適用が困難であった。

一方これらの感度解析をベースとした手法とは異なり、非線形問題に適した応答曲面法が米国を中心に急速に進歩してきた。この手法では、定められた設計空間内の選択点何点かの評価関数値から、最小2乗近似により応答曲面を決定する。そのため、微分値である感度計算は不要であり、非線形計算における感度計算の不安定性も回避できる。また、ある程度広範囲の設計空間内で成立する近似モデルが構築できるため、数値計画法による最適化の反復計算を近似モデル上で行うことが可能であり、最適化計算時間を大幅に削減できる。

### ● 実験計画法による最適化

複数モデル作成→シミュレーション→最適化

本手法では、最初の選択点の選び方が非常に重要である。設計変数の組合せを最も効率的に選択し、最小のシミュレーション回数で、精度の高い近似モデルを得るため、本手法では、従来より実験や評価に実績のある直交表を用いた実験計画法を採用している。著者らは、この直交表を用いた実験計画法と応答曲面法を従来から使用しているシミュレーションソフトと組み合わせ、効率的に最適設計を行う最適化システムCAOSの開発を行った。

## 最適化システムCAOSの概要

システムの概要を図-1に示す。本システムは実験計画法に基づく、設計変数の最適化を行うための最適設計支援システムであり、開発言語にはJAVA(JDK)を用いている。システム本体はWebサーバ上に存在し、クライアントマシンからはWebブラウザにより、システムのホーム

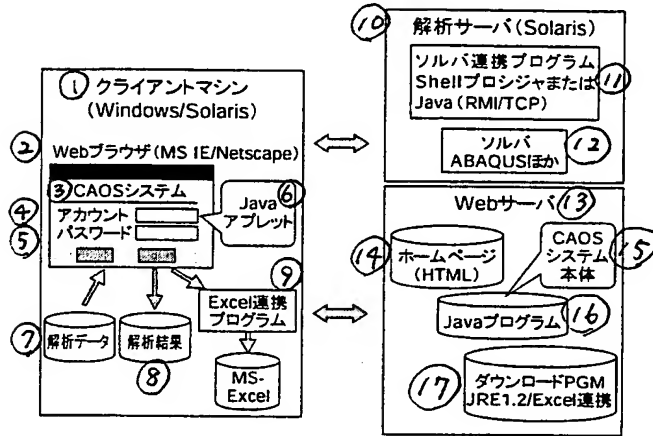


図-1 最適設計支援システム概要  
Fig.1-Outline of computer aided optimization system.

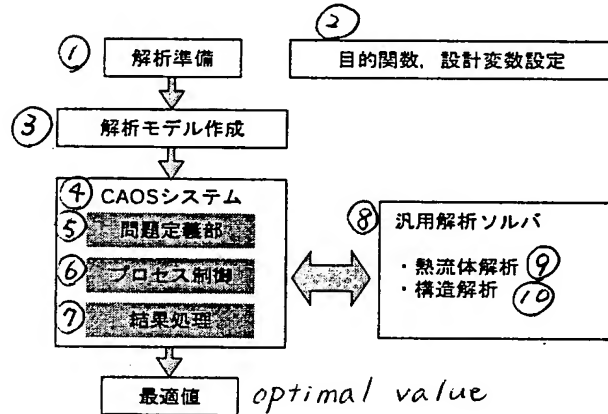


図-2 最適設計支援システムの処理フロー  
Fig.2-System flow chart of computer aided optimization system.



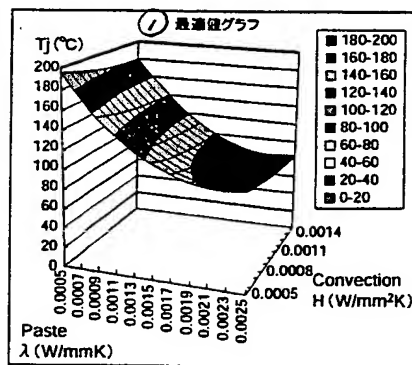
図-3 設計変数と評価関数間の3次元グラフ出力例  
Fig.3-Example 3D graph of design variables and evaluation function.

ページをアクセスすることによって利用できる。したがって、ほとんどの動作はクライアントマシンで行うため、Webサーバには負荷がかからない。このようなWebベースのシステムにすることで、システムの保守、バージョンアップなどの作業が一元化できるという利点がある。また、ユーザはクライアントマシンの機種に依存せず、システムの利用が可能になる。

システムには主に問題定義、プロセス制御、結果処理の三つの機能がある。CAOSシステム全体の操作の流れを図-2に示す。問題定義部では実験計画法に基づき、設計変数、制約条件、評価関数の指定を行う。問題定義部は設計変数の個数と水準数から最適な直交表を自動的に選択し、選択された直交表に基づき、必要なシミュレーション回数と各ケースでの設計変数の組合せをユーザに提示する。また、この決定された組合せの汎用解析ソルバの入力データが自動作成され、その情報は、つぎのプロセス制御部に自動的に受け渡される。

プロセス制御部は問題定義部で決定された問題を実際の汎用解析ソルバで実行する部分である。ユーザは解析ジョブの実施状況確認が可能であり、また、何らかの理由によりジョブを停止したい場合は、ジョブを停止することも可能である。ユーザの入力した情報や実験計画データ、シミュレーション結果などのデータはシステムのオリジナルの形式として適時、中間ファイルに保存される。シミュレーションに使用する各ソルバとデータの交換は、この中間ファイルを経由して行われる。中間ファイルと各ソルバのインタフェースを個別に開発することで、構造解析、流体解析などの多数のソルバに対応することが可能である。

結果処理部では、解析結果データ変換、分散分析、近



似多項式の構成、最適化計算を行う。近似式構成は直交多項式によって行う。最適化計算は設計変数間の交互作用の有無、水準数に応じて、2次計画法、逐次2次計画法などの数理計画法アルゴリズムが適時使用される。また、本結果処理部では、外部プログラムExcelと連携して、構築された近似多項式に基づき、任意の2変数を変化させた場合の評価関数の状況を3次元的なグラフにより表示することが可能である。3次元グラフ出力の例を図-3に示す。

## 最適設計適用事例の紹介

### 回路基板のVia構造最適化計算

本システムの実装設計への適用事例として回路基板のVia構造最適化計算の例を示す。基板の高密度配線手法として近年ビルドアップ基板が開発されており、安価に多層配線のプリント回路基板を形成することが可能で、パソコンなどの電子機器に数多く利用されている。ビルドアップ基板についてはそのビルドアップ層を構成する配線パターン部の信頼性が重要であり、とくに各層間を接続するVia部の信頼性を確保することが重要である。そこで、設計変数として図-4に示すVia部周辺各部寸法を取り、評価関数としてViaを構成する銅パターン部に生じる非線形歪みを取り、これを最小化する最適寸法を求めた。解析ソルバは汎用有限要素解析ソフトABAQUSを使用した。負荷条件として、温度サイクルによる加速試験を仮定した。これまでの経験から各設計変数間の交互作用を無視し、主効果のみを取った。直交表はL9(3<sup>4</sup>)<sup>(注)</sup>を使用し、合計9回の解析を行った。シミュレーション計

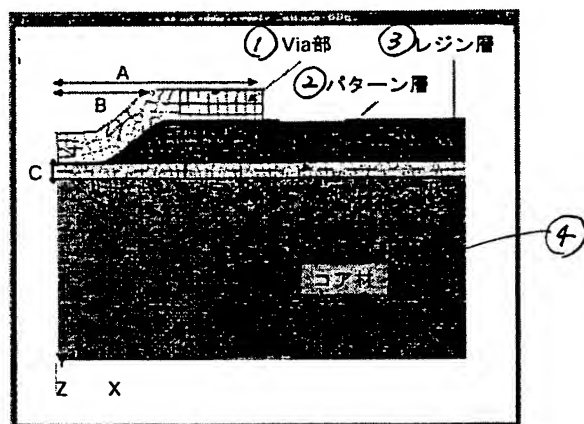


図-4 ビルドアップ基板Via部解析モデル  
Fig.4-Simulation model of buildup board via.

算の結果から抽出した最大非線形歪みより直交多項式を作成し、最適形状算出を行った。今回のシミュレーション結果では、Via下部の配線パターン寸法が歪みに与える影響が大きく、このパラメタを可能な限り大きくすることで歪みや応力を最小にできることが分かった。本システムによる最適形状では、初期の設計寸法での歪み値と比較して20%歪みが減少することが確認され、システムの有効性が確認された。

### ● 冷却ファン形状最適化

つぎの適用事例として、冷却ファン形状最適化の例を示す。近年LSIを代表とする電子デバイス発熱量の上昇により、冷却技術は重要になっている。図-5に示す冷却ファンの各部の寸法を設計変数とし、目的関数として流量を取り、流量を最大化する最適ファン形状を求めた。解析ソルバとして汎用流体解析ソフトSTAR-CDを使用した。設計変数として、ファンの内周径  $a$ 、ファンとケーシングとのクリアランス長  $b$ 、軸偏心量  $c$  の三つを取った。各設計変数ともに標準値と上限値、下限値の3水準を選択した。したがって、先例と同様に直交表はL9(3<sup>4</sup>)を使用し、合計9回の解析を行った。9回の解析結果から、ファン流量  $q$  と設計変数  $a, b, c$  間の関係は以下に示すような簡単な2次の多項式で近似できることが分かった。

$$q = 0.0387 - 0.00448(a - 11.25) + 0.00418(b - 3) + 0.00199(c - 4) - 0.00645 \{(a - 11.3)^2 - 2/3\} - 0.00395 \{(b - 3)^2 - 2/3\} - 0.000178 \{(c - 4)^2 - 2/3\}$$

本近似式と解析値の比較を行うと、解析値と近似式の

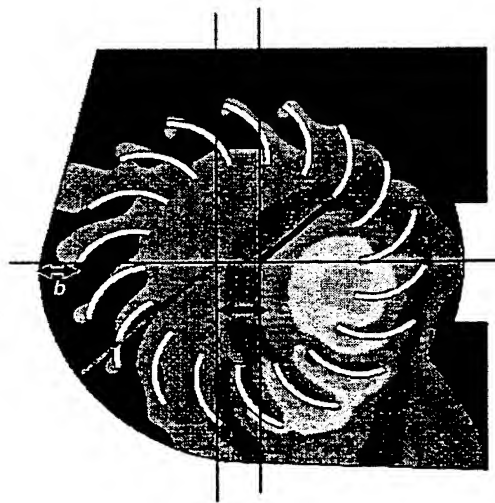


図-5 冷却ファン形状最適化モデル  
Fig.5-Optimized model of cooling fan.

(注) L9(3<sup>4</sup>)は直交表の種類を示す。9は表の行数であり、実験ケースを示す。3は設計変数水準数、添字4は表の列数を示す。

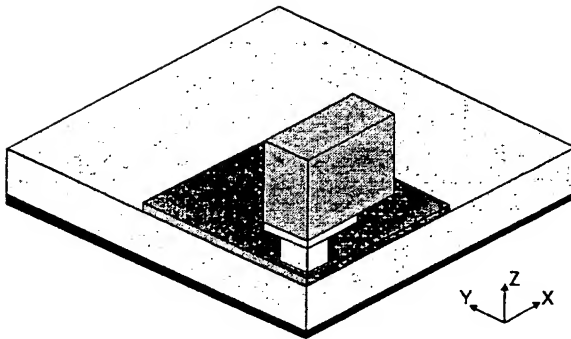


図-6 リプレースツール解析モデル  
Fig.6-Simulation model of replace tool.

誤差は最大で10%以下であり、十分な精度を持つことが確認できた。近似式から、流量を最大とする最適化計算を行った結果、ファンの内周径、クリアランスについては許容範囲内で風量を極大とする最適解を求めることができたが、軸偏心量については流量が最大値を取るときの軸偏心が設計許容範囲外にあり、軸偏心量を許容範囲内で最大に取ることによって風量を大きくできることが分かった。最適形状では、初期設計寸法(標準値)での風量と比較して約2倍の風量を得ることが確認され、本最適化システムの有効性が本件でも確認された。このように、本システムは流体シミュレーションのような複雑な現象にも有効な手法であることが確認できた。

#### ● 温度条件設定最適化

最後の事例として、リプレースツールの温度設定条件最適化の例について述べる。リプレースツールとは、大型コンピュータなどで、いったん基板にはんだ接続した部品を交換するためのツールである。リプレースツールは交換を必要とする部品のみを局部的に加熱することによってはんだを再溶融し、部品交換を行う。リプレース

時のはんだ温度は主にリプレースツールの設定温度、部品面積、はんだ量、基板サイズにより変動する。これら様々な要因がはんだ部温度に与える影響を解析し、はんだ部温度をこれら要因の近似式で表現することによって適切なツール設定温度を簡便に求めた。本例では設計変数としてツール設定温度など6パラメータを取った。解析ソルバとしては電子機器専用の熱流体解析ソフトFlothermを使用した。解析モデルを図-6に示す。本計算から得られた近似式による計算値は解析値と比較して5%の誤差範囲にあり、実用上有効であることが確認された。

#### む す び

以上、本稿では実験計画法とシミュレーションソフトを組み合わせた統計的最適化手法に基づく、最適化システムCAOSの概要と電子機器の実装設計、熱設計問題に適用した事例の紹介を行った。

今後の最適化システムの開発課題として、解析モデル作成作業の自動化、最適化計算アルゴリズムの効率化、適用ソルバの拡大が挙げられる。こうしたシステム開発の一方で、実際の設計問題への応用が重要であり、様々な製品の様々な問題へ本システムを適用し、設計品質向上を図ることが重要であると考えている。

#### 参考文献

- (1) 柏村ほか：実験計画法、数値計画法を用いた構造最適化。日本機械学会論文集A編、32、601、pp.218-223(1996)。
- (2) 柏村、白鳥、于強：実験計画法による非線形問題の最適化。初版、東京、朝倉書店、1998。
- (3) 茨木、福島：最適化の手法。初版、東京、共立出版、1993。
- (4) 鳥居、大原、赤堀：構造最適化システムのための設計感度解析。FUJITSU、45、5、pp.385-391(1994)。

